

## 여수 북부지역 화산암의 단열특성과 수리전도도와의 관계

### The Relation of Fracture Properties to Hydraulic Conductivity in Volcanic Rocks of the Northern Yosu Area

조 성 일 (Sung Il Cho)  
송 무 영 (Moo Young Song)  
김 경 수 (Kyung Su Kim)  
이 은 용 (Eun Yong Lee)

충남대학교 지질학과  
충남대학교 지질학과  
한국원자력연구소  
원자력환경기술원

#### 요약 / ABSTRACT

단열암반 내의 지하수 흐름은 단열의 분포특성과 밀접한 관계를 갖고 있으며, 수리전도도와 직접적인 관계를 갖는 인자로서 단열 틈의 크기와 단열 교차빈도가 고려된다. 본 연구는 여수반도 북부지역의 화산암에 분포하는 단열의 간격과 틈의 크기에 대한 확률밀도함수의 유형과 단열의 분포특성이 수리전도도 값에 미치는 영향 및 상관관계를 분석하였다.

단열의 분포특성은 core logging과 초음파주사 검층을 통하여 조사되었으며, 일정구간별 수리전도도는 이중패커를 이용한 정압/압력강하 시험으로서 산출되었다.

연구지역에 분포하는 단열간격과 단열조별 틈의 크기는 대수정규분포를 나타내지만, 개구성 단열 틈의 크기는 정규분포에 가깝다. Core logging에 의한 투수성 단열, 텔레뷰어 검층에 의한 개구성 단열군, 그리고 Set 1에 속하는 단열들이 교차되는 수리시험 구간에서는 수리전도도 값과 양의 상관관계를 보였다. 단열암반의 수리전도도는 투수성 단열 틈의 크기에 1차적인 영향을 받으며 단열의 교차정도 및 크기에 2차적인 영향을 받는 것으로 해석된다.

주요어 : 지하수, 단열, 수리전도도, core logging, 텔레뷰어, 확률 밀도 함수

Groundwater flow in a fractured rock mass is related to the geometric characteristics of the fracture system. The objective of this study aims to analyze the probabilistic density function of fracture properties and their relations to the hydraulic conductivity in volcanic rocks of the northern Yosu area.

Fracture characteristics were investigated by core logging and acoustic televiewer logging in four boreholes and the hydraulic conductivity was obtained from the constant pressure injection and fall-off

tests. The 303 fractures were grouped into three sets by their orientation and three fracture types by the degree of opening in aperture.

As a result of the study, the hydraulic conductivity in the test section intersected by open and semi-open fractures, conductive fractures, and set 1 fractures was very high, while closed fractures did rarely affect the hydraulic conductivity. It was recognized that the hydraulic conductivity in a fractured rock mass was preferentially affected by the aperture size of conductive fractures and fracture intersection frequency and size, secondly.

**Key Words** : Groundwater, Fracture, Hydraulic conductivity, Core logging, Televiwer, probabilistic density function.

## 서론

지하공간 활용분야에서 지질환경의 기능을 효과적으로 활용하기 위해서는 지하 지질 구조 및 이에 따른 지하수 유동 체계 해석이 선행되어야 한다. 실제로 국내·외에서 이와 관련된 연구가 수행되어, 연구결과가 많이 축적되어 있으며 현재에도 진행 중에 있다. 대상지역의 지하 지질 구조 및 지하수 유동 체계 특성을 규명하고자 할 때, 지하 매질의 불균질특성으로 인하여 초래되는 불확실성은 불가피한 것이기 때문에 공간적으로 제한된 자료(지표 노두 및 시추공)를 가지고 해석을 해야만 하는 어려움이 있다.

일반적으로 지하수 유동체계는 대상 지역에 대한 각종 지표조사와 현장시험을 토대로 수리지질학적 특성이 분석, 평가되어 규모별 유동체계가 구성되고, 도출된 자료를 이용한 개념모델의 수치해석 결과로서 유동체계를 설명하고 장기적인 변화를 예측하게 된다(원자력환경기술원, 1998). 개념 모델은 매질의 특성에 따라 크게 다공성연속체(porous continuum) 모델(Hubbert, 1940)과, 지하수는 한정된 투수성 단열(fracture)의 수리특성에 의하여 지배된다고 전제하는 단열망(discrete fracture network) 모델(Golder Assoc., 1994)로 구분될 수 있다. 이와 같은 개념을 토대로 개발된 수치모델링 프로그램들은 각각 요구되는 입력 자료에 따라 유동특성을 모사하게 된다.

분리단열개념 모델에서는 단열의 기하학적 분포 특성 및 수리특성에 대하여 개개의 값을 모두 입력자료로 사용하는 것이 아니라 확률밀도분포 형태의 값을 요구한다(강병무외, 1993). 따라서 통계적

분석을 통하여 신뢰성 있는 대표값을 입력해야만 올바른 결과를 기대할 수 있게 된다.

단열망 모델의 전제조건은 매질은 불투수성이며, 오로지 투수성 단열에 의해 지하수의 흐름이 지배된다는 것이다. 실제로 단열암반 내의 지하수 흐름은 단열의 분포특성과 밀접한 관계를 갖고 있으며, 수리전도도와 직접적인 관계를 갖는 인자로서 단열 틈의 크기와 단열 교차빈도를 고려할 수 있는 것으로 보고되었다(김경수외, 1999a). 따라서 단열 교차

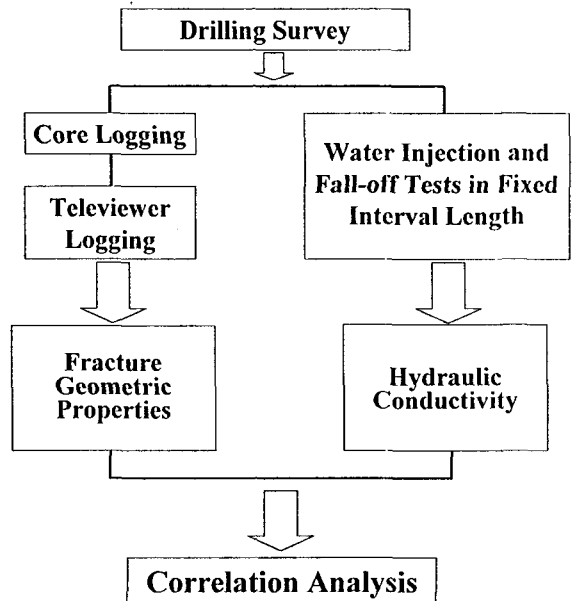


Fig. 1. Procedure for the correlation analysis of fracture properties to hydraulic conductivity.

빈도 및 단열 틈의 크기가 수리전도도에 미치는 영향과 그 상관관계의 해석이 간과되어서는 안된다.

기존 연구 자료에 의하면 확률밀도함수에 따른 단열의 간격은 지수(exponential), 대수정규(lognormal), 쌍곡선분포(hyperbolic)를 나타내며 단열 틈의 크기는 지수분포나 대수정규분포를 나타낸다고 보고되었다(Dershowitz & Einstein, 1988). 본 연구는 여수반도 북부지역의 화산암에 분포하는 단열의 간격과 틈의 크기가 어떠한 확률밀도분포를 나타내는지 조사하고, 통계기법을 적용하지 않은 산술평균 값과의 대비를 통해 신뢰성 여부를 가늠해보고자 하였으며, 이를 통하여 단열의 분포특성이 수리전도도 값에 미치는 영향 및 상호 상관관계를 분석하였다.

연구지역의 단열 분포특성을 평가하기 위해 core logging과 텔레뷰어 검층을 수행하였고, 구간별 정압수리시험에 의한 수리전도도를 산출하였다(Fig. 1).

## 시 추 조 사

연구지역은 여수반도의 북측 해안에 위치하며 전남 여수시 낙포동 일대에 해당된다(Fig. 2). 제석

산(EL. 338m)을 중심으로 독립된 산체를 이루고 있으며, 동측 사면은 완만한 경사를 이루고 있으며, 급경사의 서측 사면은 암반이 노출되어 있다.

연구지역 주변의 지질은 크게 중생대 백악기의 유천층군 화산암류와 이를 관입한 알칼리장석화강암이 분포하는데 시추조사 지점의 암체는 용결융회암으로 구성되어 있으며, 특히 연구지역은 유천층군 화산암류에 해당하는 용결 라필리 융회암으로 구성되어 있다(Fig. 2).

시추위치는 제석산 동측 사면의 해발고도 50~61m에 위치하며, 남북 방향으로 4개 공을 시추하였다. 각 시추공간의 직선거리는 K-1에서 K-2까지 10m, K-2에서 K-3까지 25m, K-3에서 K-4까지 180m이며, 총 굴진 심도는 404.59m이다(Table 1).

## 단열 분포 특성

시추공 내에서 확인할 수 있는 단열의 특성에는 방향성, 간격, 교차빈도, 틈의 크기, 조도, 투수성 등이 있다. 이와 같은 단열의 특성을 조사하기 위한 검층 장비 및 방법은 매우 다양해졌으며, 산출되는 자료의 신뢰도 또한 크게 향상되었다.

본 연구에서는 투수성 단열의 기재에 초점을 맞

Table 1. Specification of the investigation boreholes.

	K-1	K-2	K-3	K-4
Elevation(m)	61	59	57	50
Borehole Depth(GL. -m)	194.6	69.06	50.08	90.85
Drill Orientation	Vertical	Vertical	Vertical	138/80
Groundwater Table(GL. -m)	2.2	0	7.7	14
Bit Size	NX			
Casing Depth (GL. -m)	2.12	2.14	1.0	6.56

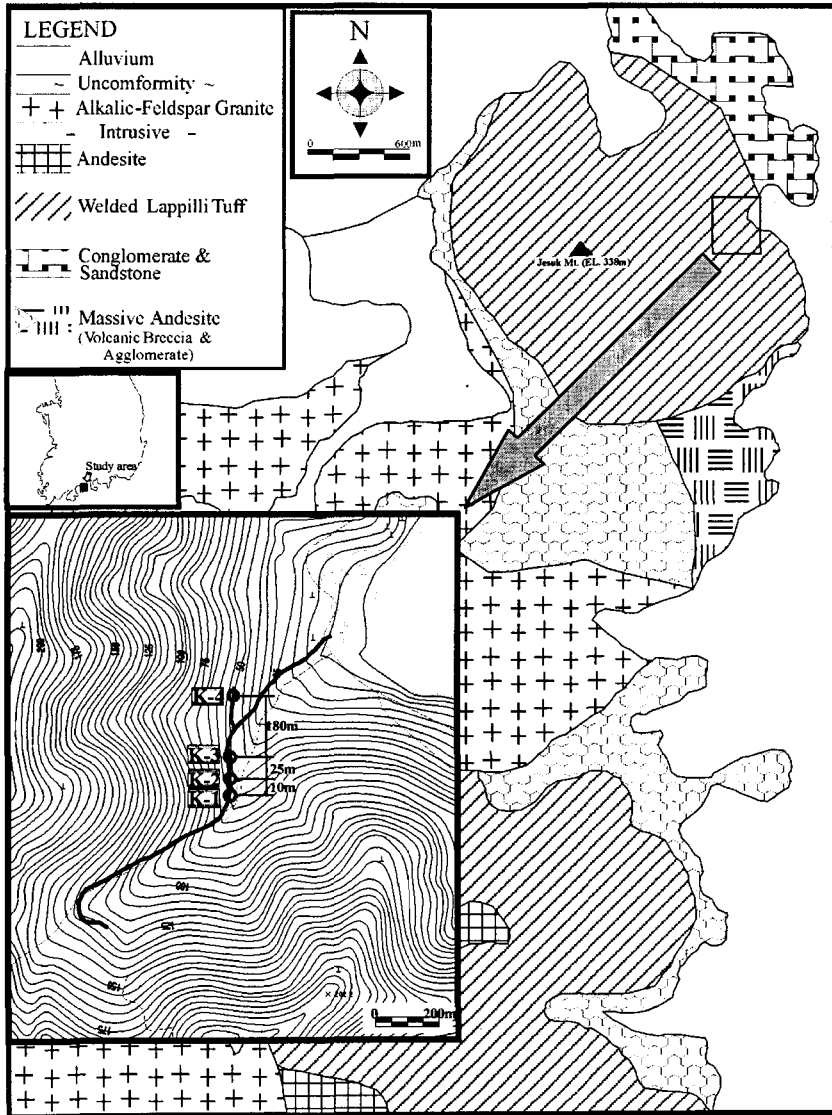


Fig. 2. Geologic map of the study area and location of boreholes(원자력환경기술원, 1988).

추어 core logging을 수행하였으며, 단열의 교차빈도, 방향성, 간격, 틈의 크기, 개·폐 여부에 대한 조사에는 텔레뷰어 검층을 적용하였다.

**단열의 분류 :** Core logging에서는 투수성단열로 추측되는 단열, 즉, 철 산화물이 피복되었거나 점토 광물이 존재하는 단열과, 방해석이나 석영으로 충전된 불투수성단열 등 두 가지로 구분하여 조사하였다.

텔레뷰어는 초음파(주파수 1.4MHz) 빔(beam)을 시추공 내벽에 주사하여, 그로부터 반사되는 파의 진폭 및 주시치를 얻게된다. 이렇게 획득된 자료를 통하여 불연속면의 기하학적 특성과 간접적인 강도 특성을 규명할 수 있다. 텔레뷰어의 주시이미지는 초음파가 시추공벽에 반사되어오기까지의 시간을 반영하므로 주시시간이 길다는 것은 단열이 열려있다는 것을 암시하게 된다. 따라서 텔레뷰어 주시이

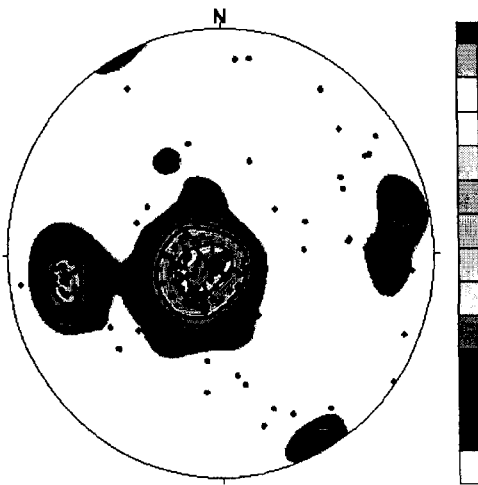
여수 북부지역 화산암의 단열특성과 수리전도도와와의 관계

미지에 단열의 흔적이 나타나면 Type 1(open fracture), 주시이미지에는 나타나지 않지만 진폭이 미지에서 현저하게 낮은 진폭치를 가지면 Type 2(semi-open fracture), 진폭이미지에만 나타나고 높은 진폭값을 가지면 Type 3(closed fracture)로 분류하였다.

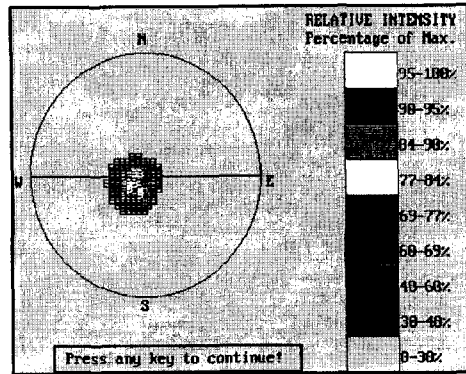
**단열의 방향성** : 4개 시추공에서 텔레뷰어 검층에 의한 조사결과, 303개 단열에 대한 정보가 수집

되었다. 이들의 방향성에 대하여는 FracMan (Golder Asso., 1994) 프로그램 ISIS 모듈에서 3개의 단열조로 분류할 수 있었다(Fig. 3).

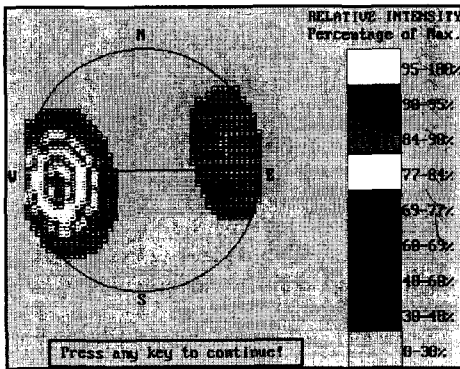
임의 방향에 거의 평행하게 발달하는 단열조에서 단열빈도는 단열조의 수선 방향을 따라서 단위미터 당 교차되는 단열의 수를 말한다. 그러나 시추조사에서 얻어지는 단열자료는 1개 단열조에 대하여 수선인 방향으로 조사된 것이 아니기 때문에



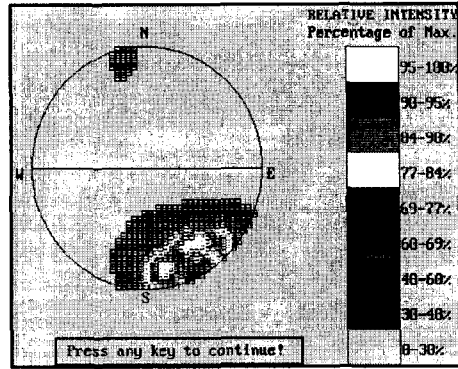
(a) All Fractures



(b) Set 1



(c) Set 2



(d) Set 3

Fig. 3. Fracture set identification using FracMan ISIS module. Fracture numbers of each set have been corrected by the modified Terzaghi correction(Golder Asso., 1994).

시추방향에 따라 조사되는 자료의 수는 실제보다 적어지게 된다. 이러한 조사방향에 의한 sampling bias를 제거하기 위하여 Terzaghi 보정을 하였다 (Terzaghi, 1965). 보정 후의 단열의 수는 원 자료보다 약 28% 증가되어, 단열조 대표방향도 약간 변함을 알 수 있었다. 단열조를 대표하는 방향(dip direction/dip)은 Set 1의 경우 50/19, Set 2는 83/85.2, Set 3는 339/85.3으로 계산되었다.

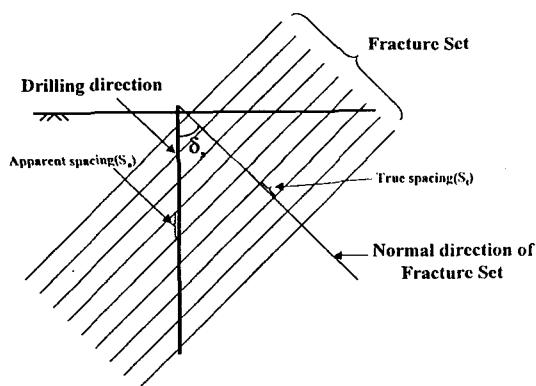
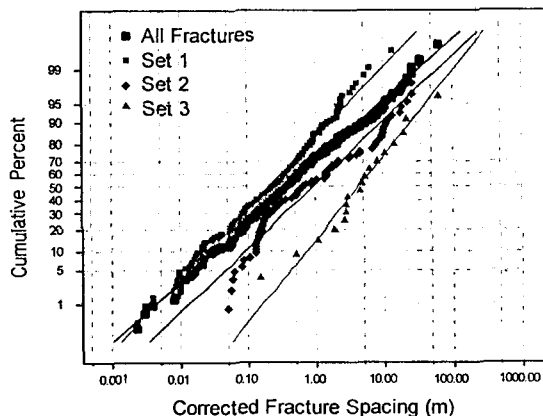


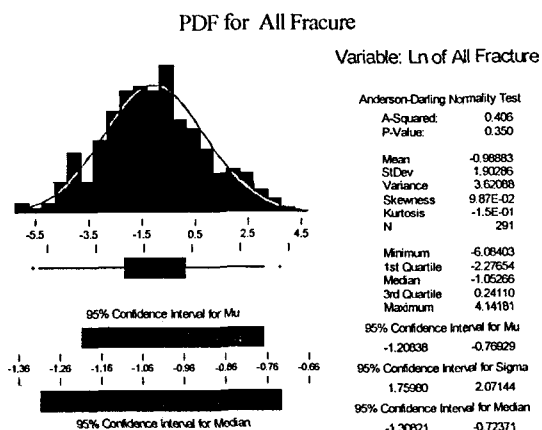
Fig. 4. Correction of fracture spacing.

한편, 연구지역을 포함하는 광역 선상구조는 연장성이 양호한 NE 계열과 상대적으로 빈도는 많고 연장성이 작은 NW 계열로 분류된다(김경수외, 1999b). 따라서 시추조사에서 확인되는 절리규모의 단열 방향성은 광역선상구조와 동일한 불연속면구(discontinuity domain) 내에 있는 것으로 사료된다.

**단열간격:** 시추공내에서 조사된 단열의 간격치는 외견치이므로, 각 단열조의 직교방향과 시추공 방향의 사이각을 계산하여 실제 간격치로 전환하는



(a) Lognormal probability plot



(b) Logarithmic probability distribution function

Fig. 5. Probabilistic distribution of the corrected fracture spacing.

Table 2. Statistics of the corrected fracture spacing.

	Set 1	Set 2	Set 3	All Fractures
<b>Logarithmic Mean <math>\pm</math> SD(m)</b>	-1.60 $\pm$ 1.63	-0.10 $\pm$ 1.81	-0.97 $\pm$ 1.41	-0.99 $\pm$ 1.90
<b>Minimum(m)</b>	0.002	0.048	0.148	0.002
<b>e<sup>Mean</sup> (m)</b>	0.20	0.91	4.19	0.372
<b>Maximum(m)</b>	13.19	34.18	62.91	62.91

보정방법(Priest, 1993)을 이용하였다. 즉, 시추공에서 교차되는 외견 간격치( $S_a$ )에 대한 실 간격치( $S_t$ )는 시추 방향이 각 단열조의 대표면과 이루는 예각( $\delta_s$ )을 이용하여 구해질 수 있다(Fig. 4).

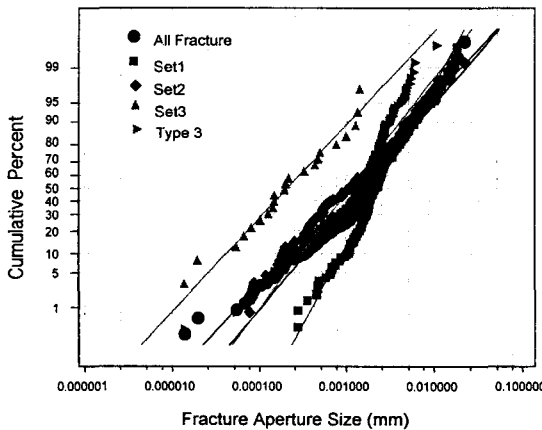
$$S_t = S_a \sin \delta_s = S_a \cos(\pi/2 - \delta_s)$$

전체 단열과 단열조별 간격에 대한 누적밀도분포함수를 분석한 결과, 모두 대수정규분포를 보였다(Fig. 5). 자연로그를 취하여 기하평균을 구하였을 때 Set 1은 0.2m, Set 2는 0.91m, Set 3는 4.19m, 그리고 전체 단열의 간격은 0.37m인 것으로 계산된다(Table 2).

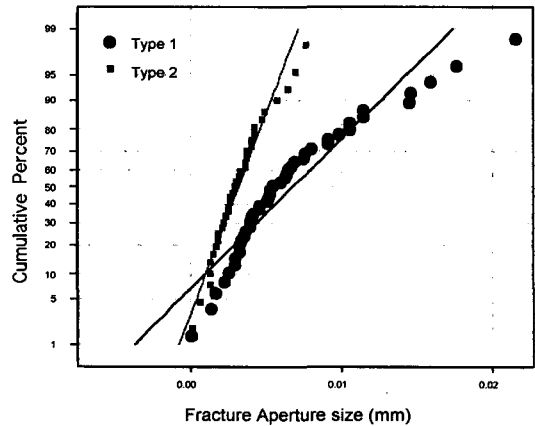
**단열 틈의 크기** : 최근 비교적 지표 노두나 터널 벽면에서 보다는 단열 면의 교란이 최소일 것으로 여겨지는 시추공 내에서의 검층 결과를 이용하여 단열 틈의 크기를 계산하는 연구가 활발히 진행 중에 있다(김경수의, 1999a). 본 연구에서는 시간과 노력을 최소화하고 신뢰성을 향상시킬 수 있는 계산방법을 적용하였다(한국원자력연구소와 한국자원연구소, 1998). 텔레뷰어 진폭이미지에서 불연속면이 인식될 경우, 그에 대한 진폭치는 상대적으로 낮은 값을 갖게 된다. 여기에서 정현곡선을 나타내는 단열주변을 일정한 크기(상하 3cm)로 잘라내어 단열틈으로 인정될 수 있는 진폭의 경계치를 선택한 후 그 이하에 해당되는 진폭치 영역과 이상에 해당되는 진폭치 영역의 면적을 계산한다면 단열틈

Table 3. Statistics of the fracture aperture size.

	Set 1	Set 2	Set 3	Type 1	Type 2	Type 3	All Fractures
<b>Logarithmic Mean <math>\pm</math> SD(mm)</b>	-6.11 $\pm$ 1.15	-6.85 $\pm$ 1.26	-8.47 $\pm$ 1.29	Arithmetic 6.79 $\pm$ 0.004	Arithmetic 3.19 $\pm$ 0.002	-6.81 $\pm$ 1.02	-6.49 $\pm$ 1.15
<b>Minimum(mm)</b>	0.27	0.074	0.01	0.01	0.06	0.01	0.01
<b>e<sup>Mean</sup>(mm)</b>	2.23	1.05	0.21	6.79	3.19	1.1	1.5
<b>Maximum(mm)</b>	17.36	21.5	1.41	21.5	7.7	5.99	21.5



(a) CDF for lognormal distribution



(b) CDF for normal distribution

Fig. 6. Probability plot for the fracture aperture size.

영역의 높이를 계산할 수 있게된다. 이 높이가 단열틈의 크기에 해당된다. 이 방법은 빠른 시간 내에 일관성 있는 정량적인 자료를 얻을 수 있는 반면, 단열이 밀집되어 있는 영역에서는 과도하게 측정될 수 있는 단점을 가지고 있다.

단열조별, 유형별 그리고 전체 단열에 대하여 틈의 크기를 누적밀도함수로 도시한 결과, 단열조는 모두 대수정규분포를 따르는 것으로 해석되었다(Fig. 6a). 한편, Type 1과 Type 2는 정규분포에 더 가까운 분포를 보이는 반면, Type 3는 대수정규분포를 나타내었다(Fig. 6b). 각각의 단열 틈의 크기에 대한 평균 값은, Type 1은 6.79mm, Type 2는 3.9mm, Type 3는 1.1mm이다. 그리고 Set 1은 2.23mm, Set 2는 1.05mm, Set 3는 0.21, 전체 단열의 평균 단열 틈의 크기는 1.5mm이다(Table 3).

### 수리전도도 분포

수리전도도 산출을 위한 시험은 이중패커에 의한 방법으로 5m 구간별 주입압력을 각각 5kg/cm<sup>2</sup>과 7kg/cm<sup>2</sup>로 하여 정물상태에 이르기까지 수행하였다. 주입단계 후 곧바로 시간에 따른 압력강하시험을 실시하였다.

구간별 수압시험 결과는 정상류와 부정류 해석 방법으로 계산되었다. 정상류 해석법에 의한 수리전도도는 균질 등방성 매질에 수직인 시험공에서의 흐름이 방사상 층류(laminar flow)라 가정하며, 주로 현재까지 사용되고 있는 공식으로는 Hvorslev 1 & 2, USBR 1 & 2 및 Moye 등이 있다(Ziegler, 1976). 주입시험의 해석은 Moye(1967) 공식을 사용하였다. Moye의 공식은 시추공 주변에서는 방사상 유동(radial flow)이 일어나며, 시추공으로부터 거리가 L/2인 지점부터 구상유동(spherical flow)으로 전환된다는 가정하에서 해석하는 것이다.

$$K = \frac{Q_p}{L H_o} \left( \frac{1 + \ln(L/d)}{2\pi} \right) \quad (1)$$

$Q_p$  = flow rate at the end of injection phase  
 $H_o$  = applied excess head in the test section  
 d = borehole diameter

$L$  = length of the test section  
 $K$  = hydraulic conductivity

일반적으로 압력강하 시험에 의한 수리전도도는 Horner 도시법을 이용하여 계산된다. Horner 도시법은 시추공 주변의 지하수 흐름을 방사상 흐름으로 가정할 때 주입 종료 시점에서의 실제 압력에 대한 압력변화는 경과시간을 대수(logarithmic)좌표로 하여 도시한다(Horner, 1951).

$$h_{ws} = h_i - \frac{q}{4\pi KL} \ln \frac{(t + \Delta t)}{\Delta t} \quad (2)$$

$h_{ws}$  = pressure in the borehole during the shut-in period  
 $h_i$  = undisturbed equilibrium pressure  
 $K$  = hydraulic conductivity  
 $q$  = flow rate at the end of the shut-in phase  
 $t$  = total injection duration  
 $\Delta t$  = elapsed time since shut-in  
 $L$  = length of the test section

정상류 및 부정류 해석에 의한 수리전도도값들은 누적분포함수에 의하여 정규분포나 지수분포보다는 비교적 대수정규분포에 가깝게 분석되었다(Fig. 7). 각각의 평균값은 1.37×10<sup>-8</sup>m/sec, 1.06×10<sup>-8</sup>m/sec로 서로 유사한 값을 갖는다(Table 4).

시험법의 차이에 의한 수리전도도값은 일반적인

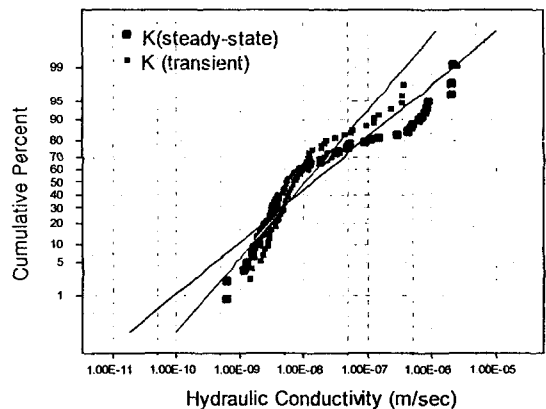


Fig. 7. Lognormal probability plot for the hydraulic conductivity.



여수 북부지역 화산암의 단열특성과 수리전도도와와의 관계

Table 4. Hydraulic conductivities based on the steady-state and transient flow.

	K(steady-state)	K(transient)
Logarithmic Mean $\pm$ SD(m/sec)	$-7.86 \pm 0.93$	$-7.97 \pm 0.66$
Minimum(m/sec)	$6.12 \times 10^{-10}$	$6.28 \times 10^{-10}$
$e^{\text{Mean}}$ (m/sec)	$1.372 \times 10^{-8}$	$1.058 \times 10^{-8}$
Maximum(m/sec)	$2.20 \times 10^{-9}$	$2.53 \times 10^{-9}$

로 정상류에 의한 값이 부정류 해석법에 의한 값보다 3~10배 가량 더 크게 계산되는 것으로 보고되었는데(Almén et al., 1986 ; Andersson and Persson, 1985), 본 시험 결과에서는 큰 차이를 보이지 않았다.

단열분포 특성과 수리전도도와와의 관계

단열암반에서 수리전도도와 직접적인 관계를 갖는 인자로서, 단열 틈의 크기와 단열 교차빈도의 복합적인 결과를 고려할 수 있다(김경수외, 1999a). 본 연구에서는 단열암반에서의 지하수 흐름은 투수성 단열에 의해서 지배된다는 전제하에, 이들이 암반의 투수성에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 단열조별 투수성 우열 정도에 대하여도 분석하였다.

상관관계를 분석하기 위하여 서로 대응되는 점들에 대해 회귀분석을 통하여 상관관계식과 상관계수를 계산하였다.

단열 교차빈도와 수리전도도 : 시추공 내 수리시험 구간에 교차되는 단열의 수를 측정하였다. 분석 결과, K-1은 100m 하부에서는 단열의 빈도수가 급격히 감소함을 알 수 있지만, 나머지 시추공에서는 지표 하 약 10~20m 이내에서 빈도수가 높을 뿐 심도가 깊어짐에 따라 빈도수가 급격히 감소하는 경향은 발견되지 않았다. Type 1과 Type 2의 단열 교차빈도는 Type 3에 비해 현저히 낮게 분포한다(Fig. 8).

수리시험 구간 내에 분포하는 전체 단열의 교차빈도는 수리전도도와 특별한 상관관계를 나타내지

는 않았다. 그러나 Type 1과 Type 2단열은 Type 3에 비해 양호한 상관관계를 갖는다(Fig. 9). 실제로 4개의 시추공 모두, Type 3의 경우 단열 교차빈도와는 무관하게 수리전도도 값이 저측됨을 알 수 있지만, Type 1과 2를 포함한 구간의 수리전도도 값은 포함하지 않은 다른 구간에 비해 상대적으로 높은 수리전도도 값을 나타낸다(Fig. 8). 따라서 단열의 개·폐 여부가 투수성에 직접적으로 영향을 미치는 것으로 판단되며, 단열조 중에서는 Set 1만이 19.9%의 다소 낮은 상관관계를 갖을 뿐 Set 2와 3는 수리전도도와 무관하였다.

Core logging에서 지하수의 유동흔적이 존재하는 단열을 포함한 구간의 수리전도도와 석영과 방해석과 같은 충전광물이 존재하는 단열을 포함한 구간의 수리전도도는 뚜렷한 차이를 나타내었다. Fig. 8의 우측은 코아의 육안관찰에 의한 것으로서, 투수성단열(실선)을 포함한 구간에서는 수리전도도 값이 크게 나타나고 있으며, 방해석이나 석영과 같은 충전광물이 존재하는 불투수성단열(점선)을 포함하는 구간에서는 수리전도도와 무관함을 알 수 있다.

단열 틈의 크기와 수리전도도 : 각 공에서의 시험구간 내 수리전도도와 단열 틈의 누적크기와의 관계는 대략적으로 비례관계에 있지만, 누적크기가 크다고 해서 반드시 수리전도도 값이 높은 것은 아니다(Fig. 10). 단열 틈의 크기 역시, Type 1과 Type 2가 수리전도도와 비교적 높은 상관관계를 나타내었으며, 단열조 중에서는 특히, Set 1이 비교적 높은 상관관계를 나타내었다(Fig. 11).

이러한 결과는, 시추공 내에서 측정된 암반의 수

리전도도는 투수성단열 틈의 크기에 1차적인 영향을 받으며, 단열의 교차정도 및 크기에 2차적인 영향을 받는 것으로 판단된다. 이는 일반적으로 인식되고 있는 암반 지하수 유동 특성은 1차적으로 단

열의 크기와 교차정도에 지배된다는 것과는 대조되는 경향으로서, 시추공 내에서 실시되는 수리시험의 영향 반경이 소규모 단열 발달영역에서는 예상보다 적은 것으로 판단된다.

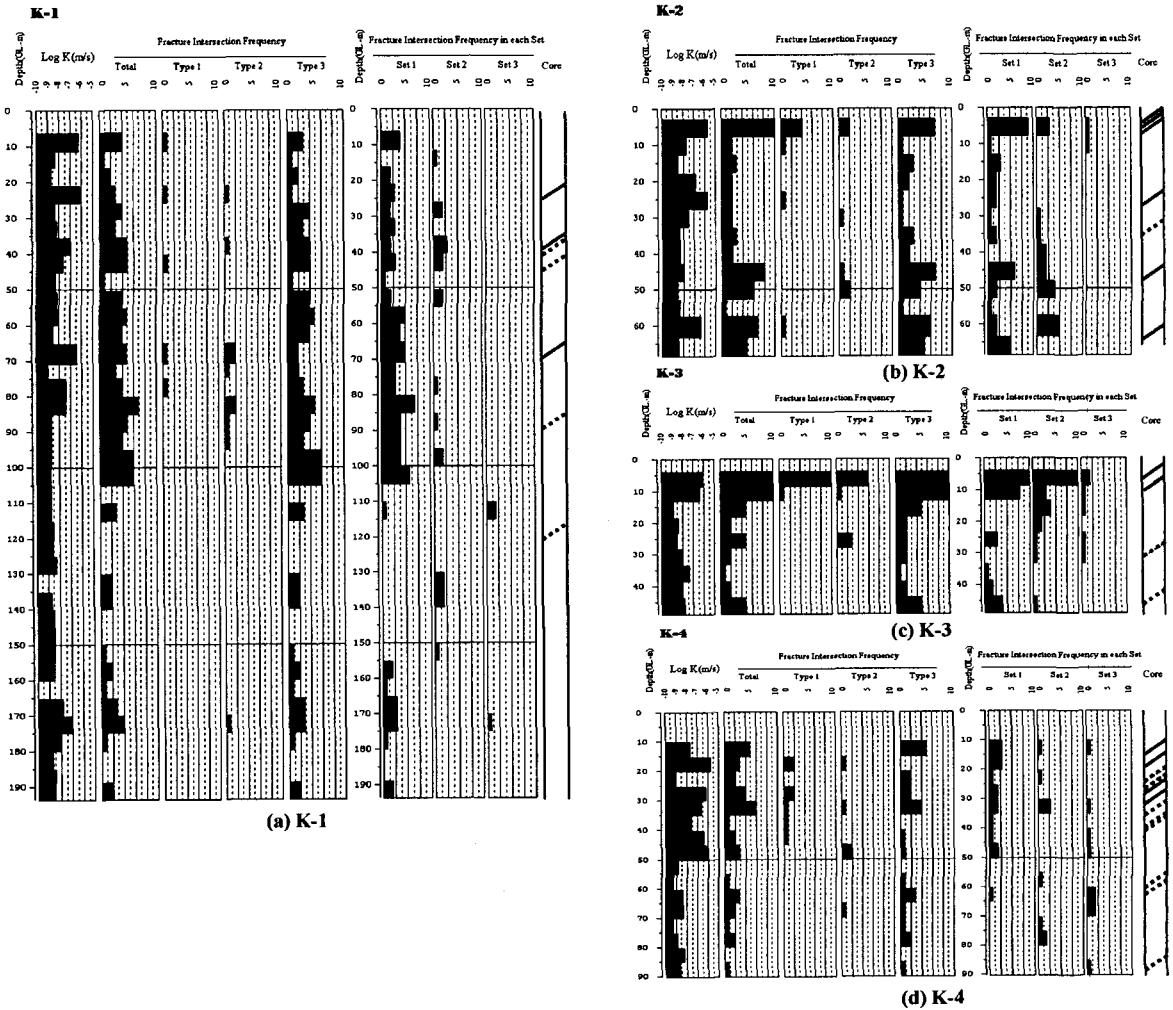


Fig. 8. Comparison of the fracture intersection frequency with hydraulic conductivity in boreholes.

여수 북부지역 화산암의 단열특성과 수리전도도와의 관계

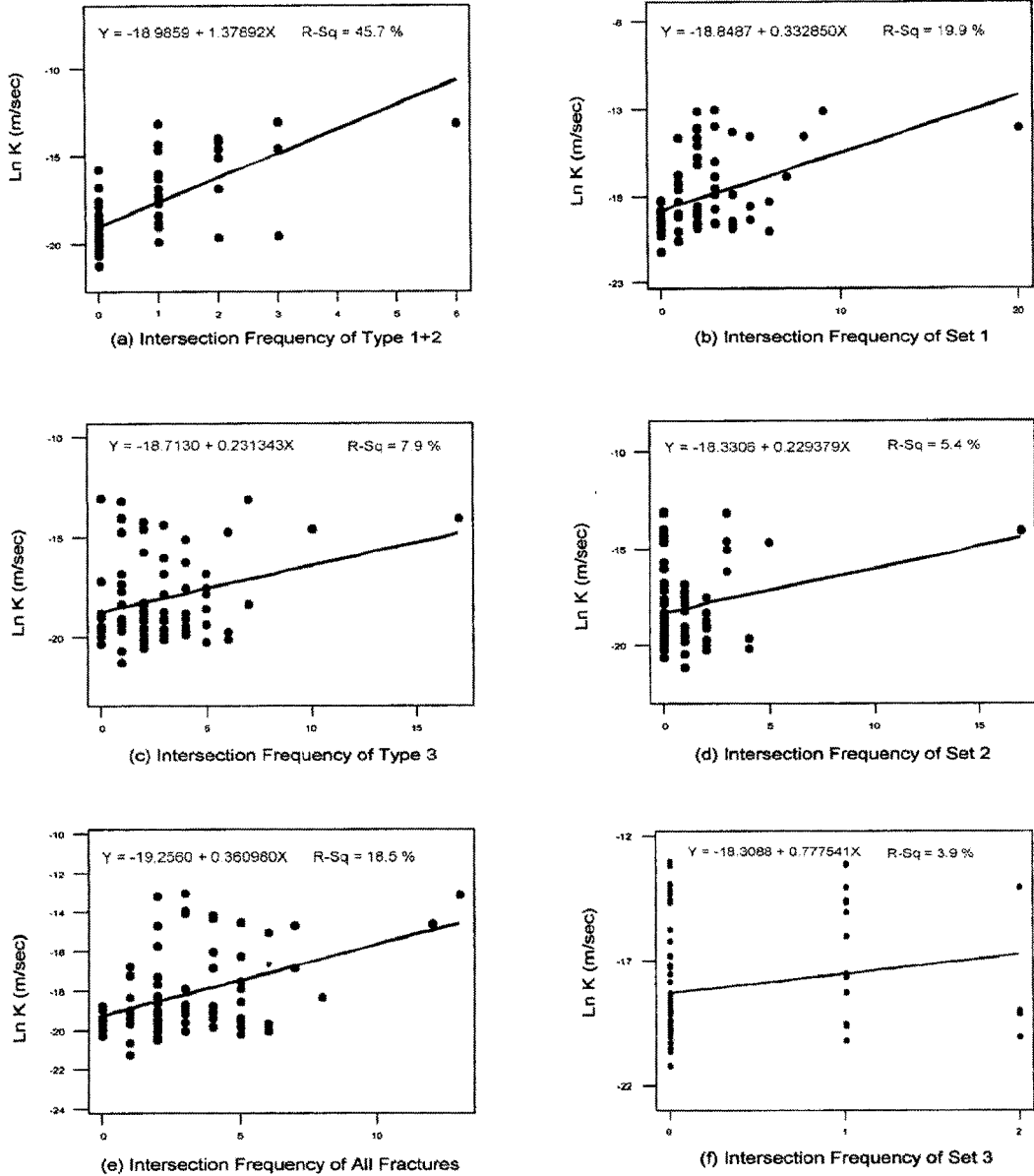


Fig. 9. Relation of the fracture intersection frequency to the hydraulic conductivity.

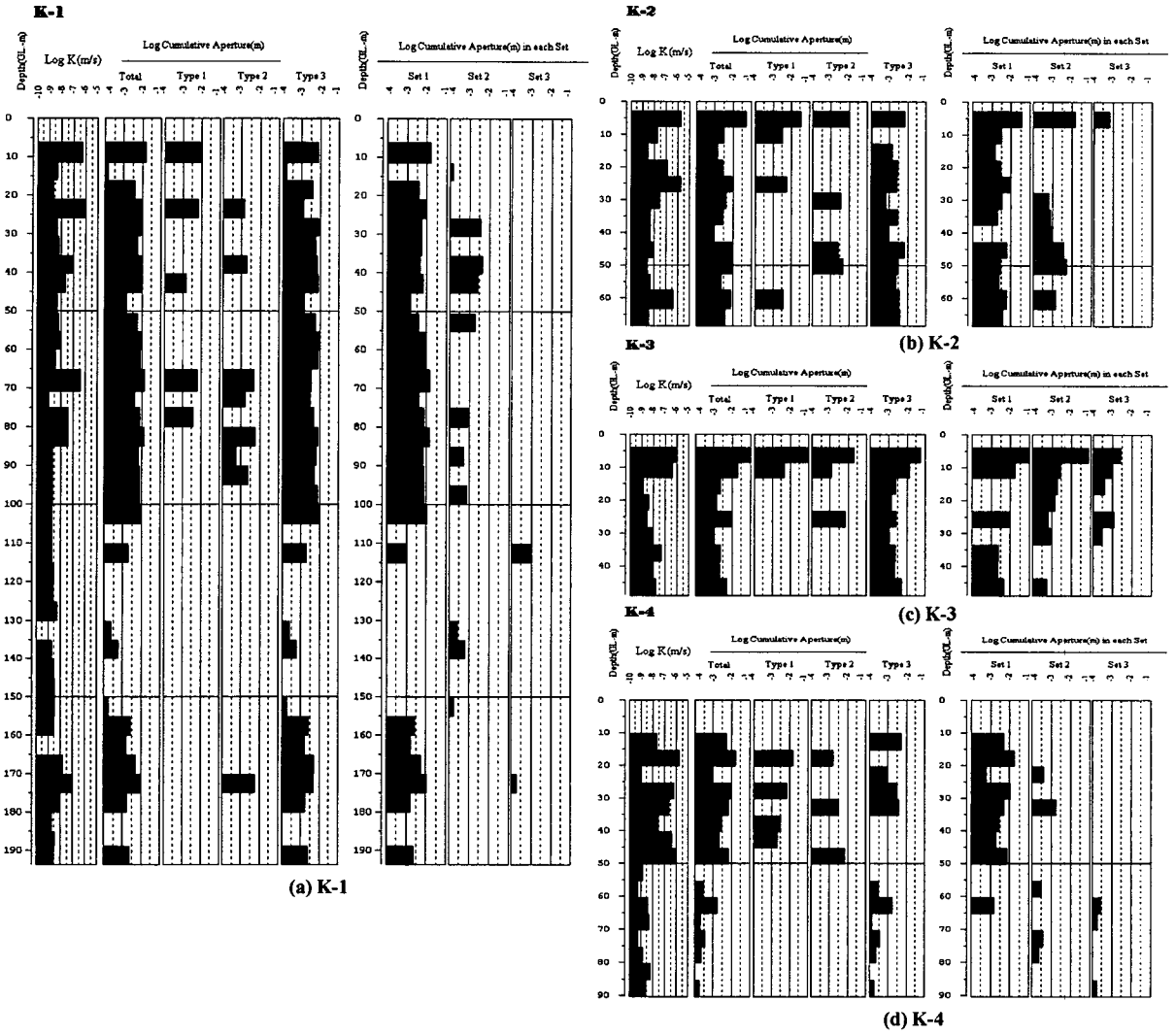


Fig. 10. Comparison of the fracture aperture size with hydraulic conductivity.

여수 북부지역 화산암의 단열특성과 수리전도도와의 관계

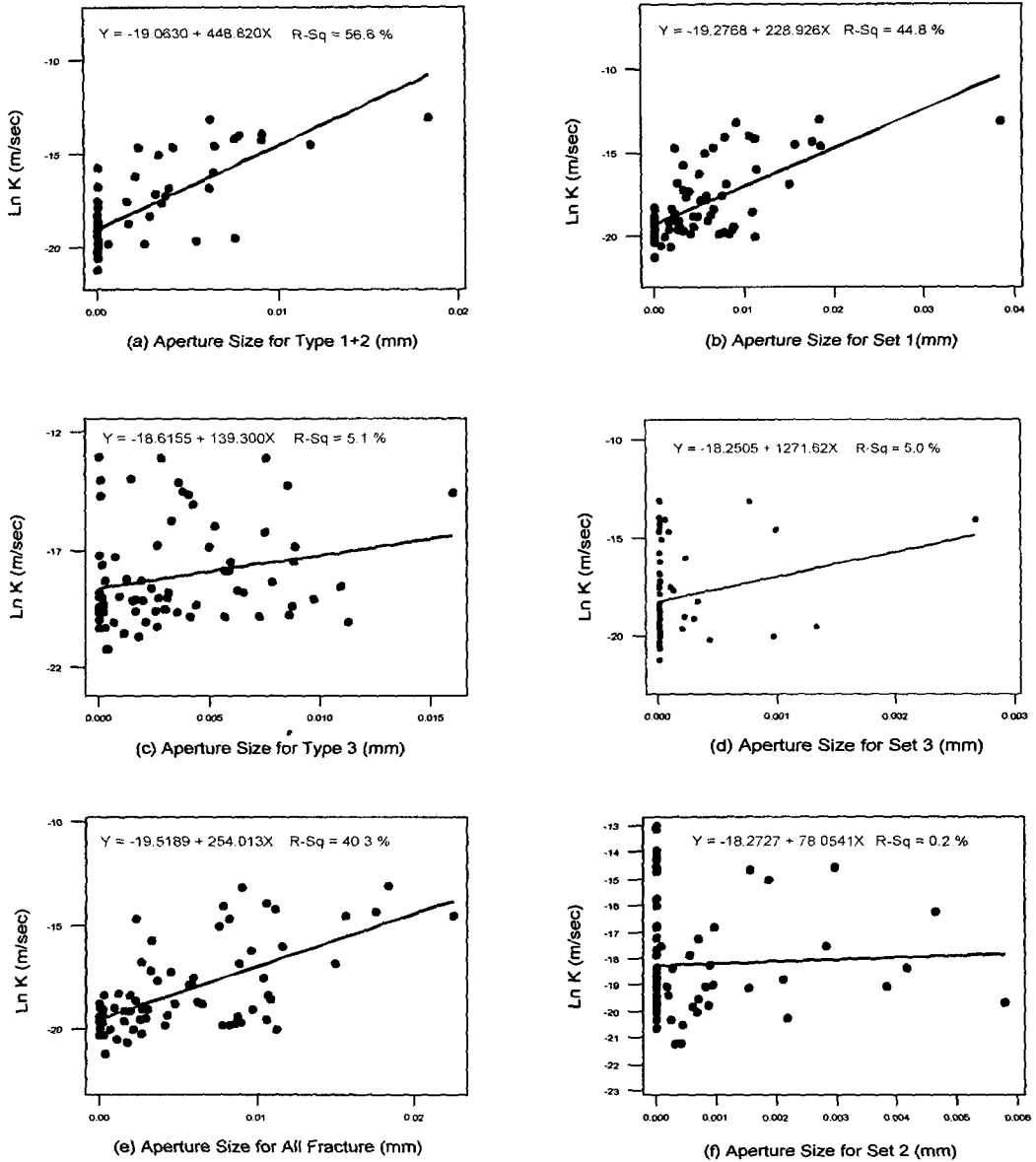


Fig. 11. Relation of the fracture aperture size to the hydraulic conductivity.

## 결 론

본 연구는 연구지역에서의 단열 간격과 틈의 크기에 대한 대표값을 확률밀도함수로 표현하고 이들이 암반 투수성에 미치는 영향을 분석하였다.

1. 단열 간격은 대수정규분포를 따르며, 단열조별 평균값은 각각 0.20m, 0.91m, 4.19m이다. 단열조별 단열틈의 크기 역시 대수정규분포를 따르며, 평균값은 0.21m~2.23m의 범위를 갖는다. Type 1과 Type 2의 단열 틈의 크기는 정규분포에 가깝고, 각각 6.79mm, 3.19mm의 평균값을 갖는다.

2. Type 1과 Type 2의 단열 교차빈도가 클수록 높은 수리전도도 값을 보이며, 회귀분석에 의한 상관계수는 0.46이고,  $\ln K=1.379X-18.98$ 의 관계식을 갖는다.

3. Type 1과 Type 2의 단열 틈의 크기는 암반의 수리전도도와 0.57의 상관계수를 가지며,  $\ln K=448.82X-19.06$ 의 관계식을 갖는다. 단열조 중에서는 특히, 저경사 단열조인 Set 1이 수리전도도와 밀접한 관계를 보였다.

4. 단열의 간격, 틈의 크기 등 기하학적인 인자에 대한 대표값들은 확률밀도함수로서 신뢰성 있게 표현될 수 있으며, 암반의 수리전도도는 투수성 단열 틈의 크기에 1차적인 영향을 받으며, 단열의 교차정도 및 크기에 2차적인 영향을 받는 것으로 판단된다.

## 사 사

본 연구는 한국전력공사 원자력환경기술원에서 시행하는 연구개발사업(과제번호: 98 NJ21)에 의하여 수행되었다. 현장조사에 협조를 아끼지 않으신 한국석유공사 관계자와 수리시험에 참여한 노영조님께 심심한 감사를 드린다.

## 참 고 문 헌

김경수, 김천수, 배대석, 고용권, 박병윤(1999a) :

Televiewer를 이용한 암반 단열분포특성 해석 기술, 한국원자력연구소, KAERI/TR-1368/99. pp.49.

김경수, 이은용, 김천수(1999b) : 여수반도 북동부지역의 선상구조와 단열계 분포특성, 지질공학회지, Vol.9, No.1, p.31-43.

원자력환경기술원(1998) : 低準位放射物處分長 水理 모델 構成技法 研究, TM.98NJ21.M1998.1, pp.280.

한국원자력연구소, 한국자원연구소(1998) : Aperture Size Analysis(AperSa) program.

Almén, K. E., Andersson, J. E., Carlsson, L., Hansson, K., & Lasson, N. A.(1986) : Hydraulic testing in crysalline rock. A comparative study of single-hole test methods, SKB Technical Report, 86-27, Stockholm.

Andersson, J. E. and Persson, O.(1985) : Evaluation of single-hole hydraulic tests in fractured crystalline rock by steady-state and transient methods, SKB Technical Report, 85-95, Stockholm.

Dershowitz, W. S., and Einstein, H. H.(1988) : Characterizing of rock joint geometry with joint system models, Rock Mech. and Rock Eng., Vol.21, p.21-51.

Golder Assoc. Inc.(1994) : FracMan-Interactive discrete feature data analysis, geometric modeling and exploration simulation(Version 2.306).

Horner, D. R.(1951) : Pressure buildup in wells, Proc. 3rd World Pet., The Hagul, Sec. II, p.503-523

Hubbert, M. K.(1940) : The theory of ground-water motion, J. Geol., Vol.48, pp.785-944.

Moye, D. G.(1967) : Drilling for Foundation Exploration, Civil Engineering Transactions, pp.95-100.

Priest, S. D.(1993) : Discontinuity analysis for rock engineering, Chapman & Hall. p.473

Terzaghi, R.(1965) : Sources of error in joint surveys, Geotechnique, Vol. 15, p.287-304.

Ziegler, T.(1976) : Determination of rock mass permeability, US Army Engineers Waterways Experiments Station, Technical Report S-76-2, Vicksburg, Mississippi, pp.88.

---

조성일, 송무영  
충남대학교 자연과학대학 지질학과  
대전광역시 유성구 궁동 220번지, 305-764  
TEL : 042) 821-6423, FAX : 042) 823-3722

김경수  
한국원자력연구소 심부지질환경특성연구  
대전광역시 유성구 덕진동 150번지, 305-353  
TEL : 042) 868-2365, FAX : 042) 868-2063

이은용  
원자력환경기술원  
대전광역시 유성구 덕진동 150번지, 305-353  
TEL : 042) 870-0363